

**PENGARUH SELULOSA TERHADAP STRUKTUR KARBON
ARANG
BAGIAN I: PENGARUH SUHU KARBONISASI**

*(The Effect of Cellulose Incorporation on Charcoal-Carbon Structure.
Part I: The Influence of Carbonisation Temperature)*

Oleh/By :

Gustan Pari¹

¹Peneliti pada Pusat Litbang Keteknikan Kehutanan dan Pengolahan hasil Hutan
Jl. Gunung Batu No. 5, Bogor 16610, Tlp. 0251-8633378, Fax 0251-8633413

Diterima 5 januari 2011, disetujui 18 Pebruari 2011

ABSTRACT

This paper deals with the effect of cellulose incorporation on charcoal structure at various carbonization temperatures. The charcoal was produced from carbonization of a 40 : 60 simulated mixture of lignin and cellulose using an electrically heated steel retort at various temperatures ranging from 200°C to 850°C. The changes in the chemical structure from raw material (uncarbonized) to lignin-cellulose charcoal (carbonized) were evaluated using nano-scale instruments, i.e. FTIR (Fourier Transform Infra red), XRD (X-Ray Diffraction) and SEM (Scanning Electron Microscope). FTIR spectra revealed that the most significant change in chemical structure of charcoal occurred at 500°C - 750°C. The absorption band intensity of OH and C = C bonds in the charcoal tended to decrease with increasing carbonization temperatures. Lignin-cellulose charcoal produced at 850°C indicatively possessed C-H bonds from the aliphatic and C-O-C bonds from the aromatic structures. Results from XRD assessment strongly suggested that the width of aromatic layers (L_a) and the interlayer spacing (d) of aromatic sheets in the charcoal decreased along with the increase of carbonization temperatures. On the other hand, the increase in carbonization temperatures brought about the increases in the height (L_c), crystallinity degree (X), and the average number of aromatic layers (al). SEM analysis showed that the number and size of pores on lignin-cellulose charcoal increased with increasing carbonization temperatures. In general, carbonization temperature of 850°C resulted in carbon with favorable qualities. As such, the produced charcoal exhibited crystallinity degree at 35.0%, height of aromatic layer (L_c) 3.22 nm, width of aromatic layers (L_a) 9.18 nm, number of aromatic layers (N) 9, and the distance between aromatic layers consecutively 0.36 nm ($d_{(002)}$) and 0.21 nm ($d_{(100)}$) with pore diameter of 2.3 μ m. This lignin-cellulose charcoal afforded more regularity in structure, higher crystallinity degree, less polarity, and larger macropores as compared to charcoal produced without incorporating cellulose.

Keywords: Lignin-cellulose mixture, carbonization, charcoal, nano measurements, chemical structure.

ABSTRAK

Tulisan ini mempelajari pengaruh selulosa terhadap struktur arang pada suhu karbonisasi yang berbeda. Arang dibuat dari hasil karbonisasi campuran simultan lignin dan selulosa dengan perbandingan 40 : 60.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh selulosa terhadap struktur arang pada suhu karbonisasi yang berbeda, yaitu 200°, 300°, 400°, 500°, 650°, 750° dan 850° C. Untuk mengetahui perubahan struktur arang yang terjadi dilakukan analisis dengan menggunakan FTIR (sinar infra merah), XRD (difraksi sinar X) dan SEM (mikroskop elektron).

Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa lebar lapisan aromatik (L_a) menurun dengan makin meningkatnya suhu karbonisasi, sedangkan untuk jarak antar lapisan aromatik (d) menurun dengan naiknya suhu sampai 850° C. Tinggi lapisan aromatik (L_a), derajat kristalinitas (X) dan jumlah lapisan aromatik (N) meningkat dengan makin naiknya suhu karbonisasi. Spektrum FTIR menunjukkan antara suhu 500° -750° C terjadi perubahan struktur kimia dari bahan baku secara nyata. Ikatan OH, dan C=C alifatik menurun dengan naiknya suhu, sedangkan struktur eter dan aromatik makin meningkat. Pada suhu 850° C arang yang dihasilkan mempunyai struktur aromatik yang permukaannya mempunyai gugus C-O-C dan C-H. Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa jumlah dan diameter pori arang meningkat dengan makin naiknya suhu karbonisasi. Kualitas arang yang baik diperoleh pada suhu karbonisasi 850° C yang ditunjukkan oleh derajat kristalinitas sebesar 35,0%, tinggi lapisan aromatik 3,22 nm, lebar lapisan aromatik 9,18 nm, jumlah lapisan aromatik 9, jarak antar lapisan aromatik $d_{(002)} = 0,36$ nm dan $d_{(100)} = 0,21$ nm dengan diameter pori arang antara 2,0-2,3 μ m. Arang ini mempunyai sifat keteraturan yang tertinggi, permukaannya bersifat sedikit polar, dengan struktur makropori.

Kata kunci : Campuran simulasi lignin dan selulosa, karbonisasi, instrumen skala nano, struktur kimia, perubahan.

I. PENDAHULUAN

Hasil penelitian Pari, *et al.* (2006) menyatakan bahwa arang yang terbuat dari lignin struktur kerangka atom karbon yang membentuk heksagonal semakin kecil dengan makin naiknya suhu karbonisasi. Hal ini ditunjukkan dengan makin rendahnya tinggi lapisan aromatik (L_a), jumlah lapisan aromatik (N) yang terbentuk sedikit dan derajat kristalinitas (X) yang makin menurun. Hal tersebut disebabkan oleh fungsi lignin yang di dalam struktur kayu sebagai perekat antar sel kayu yang ditandai oleh banyaknya pemutusan ikatan yang disebabkan panas atau suhu tinggi karbonisasi. Untuk memperbaiki struktur kerangka atom karbon pada arang, penelitian ini mencoba menambahkan selulosa pada lignin dengan jalan simulasi untuk melihat

peranannya pada pembentukan struktur arang. Pemahaman yang lebih luas dan mendalam mengenai pola struktur tersebut sangat penting sebagai dasar pembuatan arang berkualitas tinggi dan turunannya sehingga dapat diaplikasikan secara luas serta memberikan nilai manfaat lebih besar terutama untuk bidang elektronik, biosensor dan biobaterai berbasis karbon nano.

Selulosa merupakan komponen kimia utama yang terdapat dalam kayu, bersama-sama hemiselulosa dan lignin saling terikat erat dengan sistem dan sifat yang teratur seperti kristal dengan kisi kristal berbentuk monoklin. Tingkat keteraturan selulosa dicirikan oleh derajat kristalinitas yang bervariasi bergantung pada sumber bahan baku (Fengel dan Wegener, 1995). Dalam penelitian ini dilakukan pirolisa terhadap simulasi campuran lignin dan selulosa menjadi arang pada berbagai tingkatan suhu karbonisasi dengan tujuan untuk mengetahui mekanisme perubahan struktur dan sifat karbon dalam arang tersebut akibat adanya selulosa.

II. BAHAN DAN METODE

A. Bahan

Bahan baku yang digunakan adalah Lignotech yaitu lignin yang di isolasi dari larutan bekas pemasak pulp dengan proses kraft yang diperoleh dari Norwegia dan selulosa dari hasil isolasi kayu sengon yang dilakukan menurut prosedur TAPPI T17m (Anonim, 2006). Bahan kimia yang digunakan adalah KBr, NaOH, Na₂S.

B. Metoda

1. Pembuatan arang

Campuran bahan baku selulosa dan lignin dengan perbandingan bobot (b/b) 60 : 40 dikarbonisasi dalam tungku yang terbuat dari baja tahan karat dengan dilengkapi pemanas listrik dan termokopel. Proses karbonisasi dilakukan dengan cara memanaskan campuran selulosa dan lignin pada suhu 200°, 300°, 400°, 500°, 650°, 750° dan 850° C masing-masing selama 5 jam.

2. Identifikasi struktur arang

Identifikasi yang dilakukan mencakup perubahan struktur arang, topografi permukaan arang, dan uji struktur kristalit arang hasil karbonisasi pada suhu 200° - 850° C. Untuk mengetahui perubahan struktur pada simulasi campuran lignin dan selulosa yang terjadi pada masing-masing tingkat suhu selama proses karbonisasi dilakukan analisis gugus fungsi menggunakan Spektrofotometri Infra Merah (FTIR). Analisis tersebut bertujuan untuk mengetahui adanya perubahan gugus fungsi akibat perubahan suhu karbonisasi. Topografi permukaan arang hasil karbonisasi campuran tersebut dicermati dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM), yang dilakukan dengan cara

melapis bahan baku dengan platina. Selanjutnya untuk uji struktur kristalit arang yang terdiri dari derajat kristalin (X), jarak antar lapisan (d), tinggi (L_c) dan lebar (L_a) lapisan aromatik serta jumlah lapisan aromatik (N) digunakan difraksi sinar X (XRD) dengan sumber radiasi tembaga (Cu) (Iguchi, 1997; Jimenez, *et al.* 1999; Kercher, 2003).

Derajat kristalinitas (X) ditentukan dengan rumus di bawah ini :

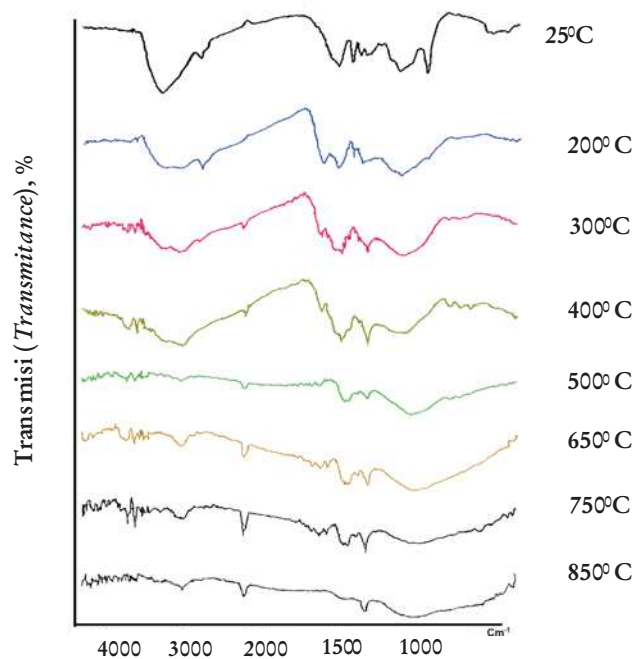
$$X = \frac{\text{bagian kristal} \times 100 \%}{\text{bagian kristal} + \text{bagian amorf}}$$

Selanjutnya struktur atom karbon dalam arang ditentukan berdasarkan persamaan berikut :

Jarak antar lapisan aromatik (d_{002}): $\lambda = 2 d \sin \theta$

Tinggi lapisan aromatik (L_c): $L_{c(002)} = K\lambda/\beta \cos \theta$

Lebar lapisan aromatik (L_a): $L_{a(100)} = K\lambda/\beta \cos \theta$



Gambar 1. Spektra infra merah simulasi campuran lignin dan selulosa (40:60) pada berbagai suhu karbonisasi (200°-850°C) dan tidak dikarbonisasi (25°C).

Figure 1. Infra red spectra for the simulated mixture of lignin and cellulose (40:60) at various carbonization temperature (200°-850°C) and uncarbonized (25°C).

Tabel 1. Bilangan gelombang infra merah simulasi campuran lignin dan selulosa pada proporsi 40 (lignin): 60 (selulosa)

Table 1. Wave number of the infra red spectra for the simulated mixture of lignin and cellulose at the proportion 40 (lignin) : 60 (cellulose)

Suhu (Temperature), °C	Bilangan gelombang (Wave number), cm^{-1}
25	3419 – 2931 – 1597 – 1509 – 1460 – 1419 – 1208 – 1043
200	3377– 3163 – 2919 – 1695– 1595 – 1507 – 1448 – 1202– 1031
300	3389 – 3177 – 2919 – 1678 – 1560 – 1396 – 1166 - 749
400	3142 – 1689 – 1554 – 1513 – 1396 – 1161 – 873
500	3130 – 1695 – 1537 – 1396 – 1125 – 873
650	3130 – 1695 – 1642- 1537 – 1396 – 1102
750	3129 – 1736 – 1695 – 1648 – 1536 – 1395 – 1066
850	3130 – 1395 – 1084

Lebih lanjut, hasil analisis spektrofotometri inframerah (Gambar 1) menunjukkan bahwa selama proses karbonisasi terjadi penguraian struktur kimia. Perlakuan panas dari karbonisasi mengakibatkan terjadinya penguraian dan perubahan gugus fungsi. Pemanasan pada suhu 400° - 850° C terbentuk gugus karbonil yang ditunjukkan adanya pita serapan pada daerah bilangan gelombang 1689 - 1736 cm^{-1} . Adanya intensitas serapan pada bilangan gelombang antara 1642 - 1695 cm^{-1} yang makin tinggi menunjukkan bahwa ikatan C=C yang terbentuk makin kuat. Pola ini sejalan dengan yang dikemukakan oleh Serrano, *et al.* (1996) yang mempelajari perubahan struktur arang dan arang aktif dari *Cistus ladaniferus*, pada suhu karbonisasi antara 200° - 1000° C. Melebarnya pita serapan dari 749 - 1600 cm^{-1} menunjukkan adanya reaksi radikal selama proses karbonisasi dan adanya reaksi baru selama proses karbonisasi. Selain itu nampak adanya vibrasi dari C=C aromatik yang ditunjukkan oleh adanya pita serapan di daerah bilangan gelombang 1537 - 1554 cm^{-1} . Hal ini diperkuat dengan adanya pita serapan di daerah 1395 cm^{-1} yang menunjukkan adanya ikatan C=C dari gugus aromatik tersubstitusi. Selain itu adanya serapan di daerah bilangan gelombang 3130 cm^{-1} menunjukkan vibrasi C-H dari senyawa aromatik. Hasil ini sesuai dengan yang diteliti oleh Sugamoto, *et al.* (2003) yang mempelajari struktur arang dari kayu sugi yang dikarbonisasi pada suhu 200° - 800° C. Adanya serapan di daerah bilangan gelombang 1066 - 1084 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi C-O. Pola ini sesuai dengan hasil penelitian Puziy, *et al.* (2003) yang mempelajari arang aktif sintetis dengan asam fosfat sebagai bahan pengaktif dan menyimpulkan bahwa makin tinggi suhu karbonisasi ada indikasi sistem cincin aromatik yang terbentuk juga semakin meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan panas pada proses karbonisasi mengakibatkan perubahan gugus fungsi yang diikuti dengan penataan kembali atom karbon. Pola

spektrum ini sesuai dengan yang dikemukakan oleh Menendez, *et al.* (1999); Ercin dan Yurum (2003) serta Kimura, *et al.* (2004) yang menyimpulkan bahwa menurunnya intensitas serapan di daerah bilangan gelombang 2700 - 3000 cm^{-1} akan meningkatkan terbentuknya senyawa aromatik dari atom karbon.

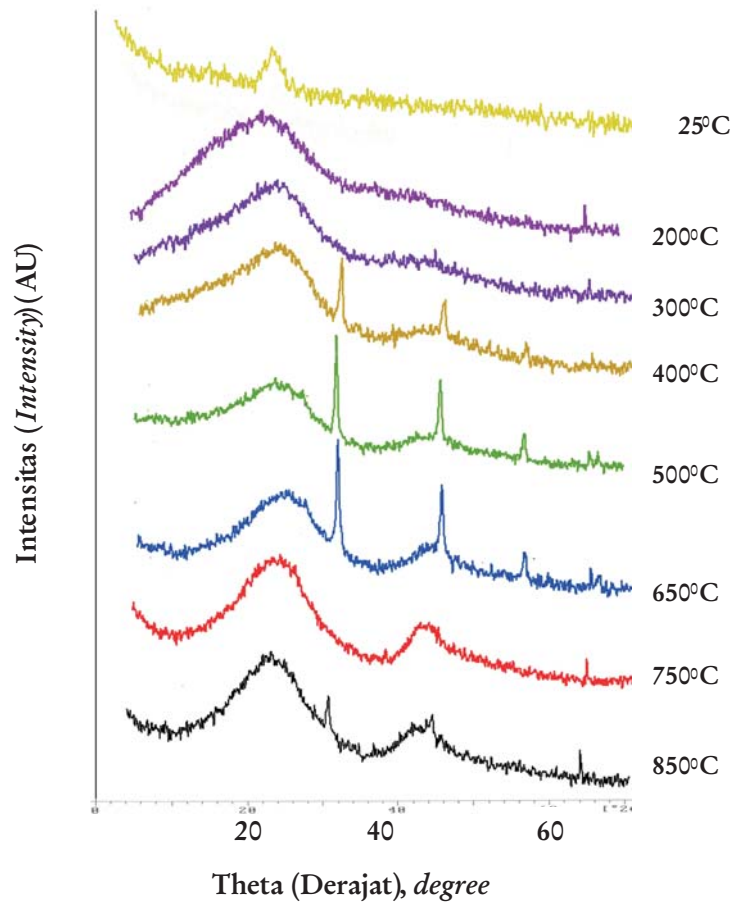
Berdasarkan data di atas dapat dikemukakan bahwa produk karbonisasi simulasi campuran lignin dan selulosa pada suhu 400° - 750° C tidak memiliki gugus fungsi OH, dan ada indikasi terjadinya perubahan gugus fungsi C=C aromatik, sedangkan karbonisasi pada suhu 850° C menunjukkan adanya vibrasi C-H, dan C-O-C dari senyawa aromatik. Adanya gugus fungsi tersebut yang menempel pada permukaan arang, maka arang yang dihasilkan sedikit bersifat polar. Lebih lanjut, berdasarkan interpretasi hasil analisis spektrofotometer infra merah, dapat diindikasikan bahwa ikatan C=O dan C-O berasal dari selulosa maupun lignin akibat karbonisasi, ikatan C=C dan C-O-C aromatik berasal dari lignin. Hal yang penting adalah, lignin yang digunakan untuk simulasi campurannya dengan selulosa adalah lignin hasil proses pengolahan pulp kraft, jadi sudah banyak mengalami perubahan fisik dan kimianya dibandingkan dengan lignin asli (*native lignin*). Di antara gugus yang umum terdapat pada lignin kraft adalah gugusan C=O, C=C, dan C-O-C (Pearle, 1967 dan Sjostrom, 1982).

B. Identifikasi Pola Struktur Kristalit

Difraktogram dari XRD (Tabel 2) menunjukkan pola yang berbeda dengan pola XRD pada lignin Pari *et al.* (2006) dalam hal tinggi (Lc) semakin tinggi pada suhu karbonisasi tinggi, dan lapisan aromatiknya makin pendek. Lebar (La) lapisan aromatiknya semakin melebar dan jumlah lapisan (N) aromatik yang makin sedikit dengan meningkatnya suhu karbonisasi dari 200° - 850° C. Untuk karbonisasi terhadap simulasi campuran lignin dan selulosa pada awal pemanasan (200° C) ada indikasi daerah amorf dari bahan baku dengan derajat kristalinitas 32,6% terdegradasi menjadi 5,0% membentuk struktur baru yang ditunjukkan dengan terjadi perubahan theta (θ) dari 15,0° menjadi 22,4° dan selanjutnya kristalinitas meningkat dengan naiknya suhu karbonisasi (Tabel 2) disertai dengan terbentuknya struktur kristalit baru, yang ditunjukkan oleh munculnya intensitas baru di daerah theta (θ) 24° dan 43° pada suhu karbonisasi 300° C (Gambar 2). Fenomena ini mirip dengan pola yang terjadi struktur lignin (Pari, 2006) yang berarti bahwa pada suhu karbonisasi 300° C terjadi dekomposisi baik lignin maupun selulosa yang disusul dengan terbentuknya struktur kristalit baru pada daerah theta 25° dan 43° (Huang and Saka, 2003). Peningkatan derajat kristalinitas berlangsung terus sampai suhu karbonisasi 850° C. Hal ini terjadi karena struktur dasar selulosa bersifat kristalin. Sifat ini menguntungkan dalam pembuatan struktur karbon dalam arang, karena pola struktur arang yang ideal pada umumnya mempunyai derajat kristalinitas yang relatif besar (Ota and Mozammel 2003). Tabel 2 dan Gambar 2 juga menunjukkan bahwa tinggi lapisan (L_c) antar susunan kristalit karbon dalam arang

semakin meningkat dengan naiknya suhu karbonisasi. Fenomena ini menggambarkan adanya penguatan ikatan antar atom karbon dalam selulosa sehingga jarak antar lapisan aromatik (d) menurun, dan jumlah lapisan aromatik (N) bertambah, serta lebar lapisan (L_a) menyempit. Hasil ini kebalikan dari struktur arang hasil karbonisasi lignin saja (100%). Hal ini menunjukkan bahwa atom karbon dari selulosa sangat berperan dalam pembentukan struktur karbon dalam arang. Ini disebabkan selulosa merupakan polimer linier di mana monomernya (glukosa) saling berikatan satu terhadap yang lainnya secara *head-to-tail* melalui ikatan β 1,4-glukosida. Selanjutnya polimer linier tersebut tersusun rapat secara lateral antar rantai polimer dengan rantai lainnya akan membentuk mikrofibril dan fibril, sehingga kristalinitas selulosa tersebut meningkat di mana berperan pada kekuatan struktur atom selulosa tersebut (*native cellulose* atau produk turunannya arang lignin-selulosa). Berbeda dengan selulosa, lignin merupakan polimer berunit monomer fenilpropan yang saling berikatan satu terhadap lainnya secara *head-to-tail*, *head-to-head* dan *tail-to-tail*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa lignin merupakan polimer 3 dimensi. Ikatan tiga dimensi tersebut berakibat pergerakan segmen monomer-monomernya tidak bebas satu terhadap yang lainnya. Ini mengakibatkan polimer lignin bersifat kaku tetapi rapuh (amorf). Situasi ini berbeda dengan polimer selulosa (satu dimensi), di mana segmen monomernya bebas bergerak satu terhadap lainnya (bisa berayun ke atas ke bawah, bergerak lateral ke kiri ke kanan

Suhu ($^{\circ}\text{C}$) (<i>Temperature</i>)	X (%)	θ ($^{\circ}$)	d_{002} (nm)	θ ($^{\circ}$)	d_{100} (nm)	$L_e(002)$ (nm)	N	$L_a(100)$ (nm)
25	32,6	(15,0)	0,5899	(22)	0,4035	-	-	-
200	5,0	(22,4)	0,3964	-	-	2,0003	5,04	-
300	6,5	(24,0)	0,3703	(43)	0,2101	2,2942	6,20	-
400	13,5	(24,0)	0,3703	(43)	0,2101	2,6766	7,22	17,45
500	17,2	(24,0)	0,3703	(43)	0,2101	2,9201	7,87	13,91
650	24,1	(24,6)	0,3614	(43)	0,2101	3,0911	8,54	11,63
750	34,8	(24,8)	0,3586	(43)	0,2101	3,2168	8,97	9,69
850	35,0	(25,0)	0,3557	(43)	0,2101	3,2180	9,05	9,18



Gambar 2. Difraktogram XRD simulasi lignin dan selulosa (40:60), yang mengalami karbonisasi (200°-850°C) dan tidak dikarbonisasi (25°C)

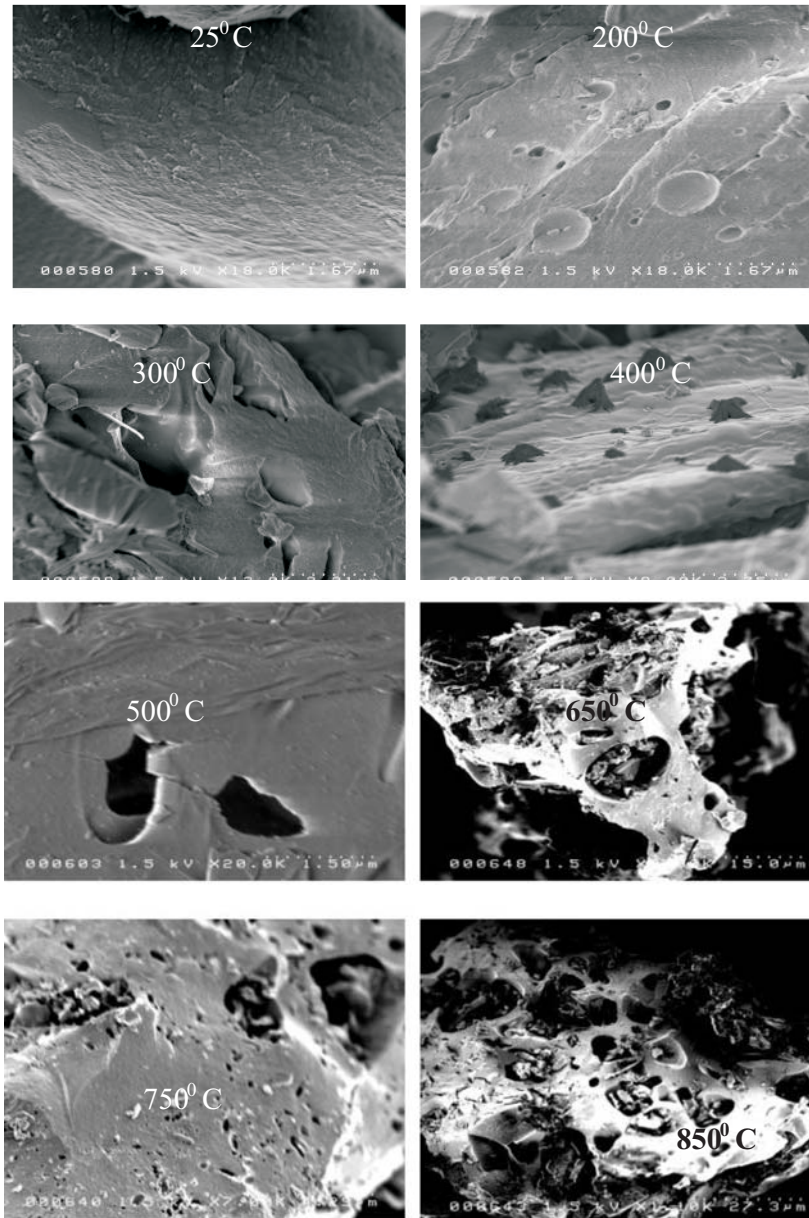
Figure 2. XRD Diffractograph for the simulated mixture of lignin and cellulose (40:60) already sustained carbonization (200° - 850°C) and uncarbonized (25°C)

Berdasarkan data di atas dapat dikemukakan bahwa peningkatan suhu dalam proses karbonisasi campuran lignin dan selulosa mengakibatkan terjadinya pergeseran antar lapisan kristalit dalam selulosa dan mengubah strukturnya sehingga terbentuk pola struktur baru.

C. Identifikasi Pola Struktur Pori

Hasil analisis mikrofotograf SEM menunjukkan bahwa pada suhu karbonisasi 400° C sudah terjadi proses pembentukan pori akibat pemanasan yang ditandai dengan melepuhnya bahan (Gambar 4). Semakin tinggi suhu karbonisasi dari 500° - 850° C, terjadi peningkatan diameter pori menjadi lebih besar sampai suhu dan nampak adanya kerusakan pada dinding pori yang ditandai dengan bergabungnya dinding pori yang kecil dengan pori yang lain membentuk pori yang lebih besar (Hayashi, *et al.* 2002). Apabila dibandingkan dengan struktur pori arang dari lignin, pada suhu karbonisasi 200° C sudah terjadi kerusakan dinding pori. Hal ini lebih menunjukkan fungsi selulosa sebagai penyusun struktur kerangka karbon dalam arang yang menyerupai struktur grafit.

Ukuran pori yang terbentuk berkisar antara 0,3 - 2,3 μm (Tabel 3), ukuran ini termasuk ke dalam struktur makropori karena lebih dari 0,025 μm (Beukens, *et al.* 1985). Berdasarkan pola topografi permukaan yang disajikan pada Gambar 4 diduga bahwa pori yang terbentuk dan teratur berasal dari adanya penguapan komponen selulosa yang terdegradasi, (Novicio, *et al.* 1998) yang mengemukakan bahwa proses terbentuknya pori diakibatkan oleh menguapnya zat terbang dari bahan baku akibat proses karbonisasi. Bila dikaitkan dengan ukuran pori yang terbentuk ada kemungkinan bahwa semakin lebar dan banyaknya diameter pori dengan



Gambar 4. Topografi permukaan arang hasil karbonisasi simulasi campuran lignin dan selulosa (40:60) pada berbagai suhu (200° - 850° C).

Figure 4. Topography surface of charcoal resulting from the carbonization on the simulated mixture of lignin and cellulose (40:60) at various temperature (200° - 850° C)

Tabel 3. Diameter pori permukaan arang hasil karbonisasi pada berbagai variasi suhu (200°-850° C)

Table 3. Diameter pore on the surface of charcoal after carbonization at various temperature (200° - 850° C).

Suhu (Temperature), °C	Diameter (Diameter), μm
200	0,3 – 0,6
300	0,4 – 0,7
400	0,9 – 2,4
500	1,0 – 2,1
650	1,8 – 2,0
750	2,0 – 2,2
850	2,0 – 2,3

IV. KESIMPULAN

1. Proses karbonisasi terhadap simulasi campuran selulosa dan lignin menjadi arang memutus ikatan gugus fungsi dan permukaan arang mengandung ikatan C- O-C, dan C-H dari senyawa aromatik, arangnya sedikit bersifat polar
2. Terbentuk struktur kristalit baru selama karbonisasi campuran selulosa dan lignin dengan adanya sudut theta 25° dan 43°. Struktur kerangka atom karbon dalam arang meningkat sampai suhu 850° C yang ditandai dengan meningkatnya derajat kristalinitas (X), tinggi lapisan aromatik (L_a) dan jumlah lapisan aromatik (N).
3. Struktur arang yang baik diperoleh pada suhu karbonisasi 850° C memiliki derajat kristalinitas (X) sebesar 35,0%, tinggi lapisan aromatik (L_a) 3,22 nm, lebar lapisan aromatik (L_a) 9,18 nm, jumlah lapisan aromatik (N) 9, jarak antar lapisan aromatik $d_{(002)} = 0,35 \text{ nm}$ dan $d_{(100)} = 0,21 \text{ nm}$ dan diameter pori arang antara 2,0-2,3 μm dan arangnya bersifat makropori.
4. Struktur karbon dalam arang terindikasi lebih banyak disusun oleh selulosa atau peranan selulosa lebih besar dari pada lignin.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2006. TAPPI T 17 m. Test Methode. Atlanta, Georgia.
- Byrne C.E, Nagle D.C. (1997). Carbonized wood monoliths-characterization. Carbon. 35 (2): 267-273.

- Brandl, W., G. Marginean., V. Chirila, and W. Warschewski. 2004. Production and characterisation of vapour grown carbon Fiber/polypropylene composites. *Carbon* 42: 5-9.
- Buekens, A., Keirsse, H., Schoeters, J and A. Verbeeck. 1985. Production of activated carbon from Euphorbia Tiraculli. Vrije Universiteit Brussel.
- Ercin D, Yurum Y. (2003). Carbonisation of fir (*Abies bornmulleriana*) wood in an open pyrolysis system at 50 300°C. *J Anal and Appl Pyrol*. 67: 11-22.
- Fengel, D and G. Wegener. 1995. Kayu: kimia, ultrastruktur, reaksi-reaksi. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hayashi, J., T. Horikawa., I. Takeda., K. Muroyama, and F.N. Ani. 2002. Preparing activated carbon from various nutshells by chemical activation with K₂CO₃. *Carbon* 40: 2381-2386.
- Huang B. Saka S. (2003). Photocatalytic Activity of TiO₂ Crystallite-activated carbon composites prepared in supercritical isopropanol for the decomposition of formaldehyde. *J. Wood Science*. 49(1): 79-85.
- Hiemenz, P.C. 1986. Polymer chemistry: The basic concepts. Marcel Dekker, Inc. New York (USA) - Basel (W. Germany).
- Iguchi M. 1997. Practice of polymer X-ray diffraction (Short-course textbook). Bandung Institute of Technology, Bandung.
- Jimenez A. Iglesias M.J. Defarge F.L. Ruiz I.S. (1999). Effect of the increase in temperature on the evolution of the physical and chemical structure of vitrinite. *J Anal and Appl Pyrol*. 50: 117-148.
- Kercher A. Nagle D.C. (2003). Microstructural evolution during charcoal carbonization by X-ray diffraction analysis. *Carbon* 41: 15-27.
- Kimura Y. Sato, T. Kaito C. (2004). Production and structural characterization of carbon soot with narrow UV absorption feature. *Carbon*. 42: 33-38.
- Kubo, S., Uraki, Y and Y. Sano. Caralytic graphitization of hardwood acetic acid lignin with nickel acetate. *J. Wood Science*. 49 (2): 188-192.
- Lopez, M.C.B., A.M. Alonso, and J.M.D. Tascon. 2000. N₂ and CO₂ adsorption on activated carbon fibers prepared from nomex chars. *Carbon* 38: 1177-1182.
- Menendez J.A. Menendez E.M. Iglesias M.J. Garcia A. Pis J.J. (1999). Modification of the surface shemistry of active carbons by means of microwave induced

- treatments. Carbon. 37: 1115-1121.
- Novicio L.P. Hata T. Kajimoto T. Imamura Y. Ishihara S. (1998). Removal of mercury from aqueous solutions of mercuric chloride using wood powder carbonized at high temperature. J. Wood Research. No 85: 48-55.
- Ota, M. and H. M. Mozammel (2003). Chemical kinetics of Japanese cedar, cypress, fir and spruce and characterization of charcoal. J. Wood Science. 49 (1): 248-254.
- Pearle, I.A. 1967. The chemistry of lignin. Marcel Dekker, Inc. New York (USA).
- Pari, G., Sofyan, K., Syafii, W., Buchari dan H. Yamamoto. 2006. Kajian struktur arang dari lignin. Jurnal Penelitian Hasil Hutan 24 (1): 9-20.
- Puziy, A.M., Poddubnaya, O.I., Alonso, A.M., Garcia, F.S. and J.M.D. Tascon. 2003. Synthetic Carbons Activated with Phosphoric Acid III. Carbons Prepared in Air. Carbon. 41: 1181-1191.
- Serrano, V.G., Villegas, J.P., Florindo, A.P., Valle, C.D and C.V Calahorro. 1996. FT-IR Study of Rockrose and of Char and Activated Carbon. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 36: 71-80.
- Schukin L.I., Kornnievich M.V. Vartapetjan R.S. Beznisko. S.I. (2002). Low temperature plasma oxidation of activated carbons. Carbon. 40:2021-2040.
- Sjostrom, E. 1995. Kimia Kayu. Dasar-dasar dan penggunaan. Penerbit : Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Sugamoto, K., Matsushita, Y. and T. Matsui. 2003. Preparation and Analysis of Carbonization Products Prepared from Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Wood. Proceedings of The IAWPS 2003. International Conference on Forest Products Better Utilization of Wood for Human, Earth and Future. Daejeon, Korea.
- Yoon, S.H., C.W. Park., H. Yang., Y. Korai., I. Mochida., R.T.K. Baker and N.M. Rodriguez. 2004. Novel carbon nanofibers of high graphitization as anodic materials for lithium ion secondary batteries. Carbon 42: 21-32.